配管系の簡易弾塑性応答解析手法*

大谷 章 仁^{*1}, 中村 いずみ^{*2}, 高 田 一^{*3}

Simplified Elastic Plastic Response Analysis Method of Piping

Akihito OTANI^{*4}, Izumi NAKAMURA and Hajime TAKADA^{**} Nuclear Power Project Dept., Energy System Div., Ishikawajima-Harima Heavy Industries, Co., Ltd.,
1 Shin-Nakahara-cho, Isogo-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 235-8501 Japan

When plastic deformation occurs in the piping under extreme seismic excitation, large damping effect will cause with the energy dissipation by plastic deformation. In this study, the simplified analysis method to obtain maximum response displacement of elastic plastic response of piping was investigated. The vibration energy and the dissipation energy with plastic deformation of piping were obtained by FEM analysis. The equivalent damping ratio depending on the piping response was formulated from both energies. On the other hand, piping response depends on the damping ratio. Both of them depending on each other were calculated as a pair of the converged values on each excitation level. The maximum displacements of the elastic plastic response calculated by this method resulted in appropriate simulation results to compare with excitation tests.

Key Words : Pipe Line, Plasticity, Damping, Nonlinear Vibration, Numerical Analysis

1. 緒 言

地震により大きな振動応答を生じる配管系では、エルボ等の配管系の一部において局所的な塑性変形を生じる可能性がある。一般的に塑性変形が生じる場合、振動エネルギーが消散され、配管系の振動応答は低減されると言われている。

日本の原子力発電プラント配管系の耐震設計では、地震に伴う配管系の振動応答で発生する応力が計算され、塑性崩壊を防止するための1次応力評価、交番応力発生による疲労破壊を防止するための疲労評価が行われる。なお、設計用限界地震 (S_2 地震) に対する評価では、配管の許容応力は降伏応力以上であり、塑性変形を生じることが想定されている。

配管系の地震応答計算に用いられる耐震設計用減衰定数 (臨界減衰比) では、配管支持具類及び保温材における減衰効果が考慮されているが、配管本体の塑性変形により生じる減衰効果については考慮されていない。そのため塑性変形が生じるような大きな地震応答では減衰効果を過小評価することとなり、配管系の評価は過度に保守的になる可能性がある。

本研究では、配管の塑性変形による減衰効果を等価線形減衰として考慮した簡易弾塑性応答解析法について検討を行った。

2. 記 号

α_0	: 代表解析での入力レベル
α_{in}	: 入力レベル (入力波の最大加速度)
δ	: エルボ開閉変位量
γ	: エルボ曲げ角度と最大応答変位の比率 ($= \theta / X_{max}$)
θ	: エルボ曲げ角度
ω_n	: 固有角振動数
ζ	: 減衰比
ζ_{eq}	: 弾塑性応答における等価減衰比
ζ_{EL}	: 弾性域の減衰比
ζ_{PL}	: 塑性変形による等価減衰比
B_i	: 最大応答変位に関する近似式の係数
A_i	: 消散エネルギーに関する近似式の係数
E	: 振動エネルギー
ΔE	: 塑性変形による消散エネルギー
Δe	: 各エルボの塑性変形による消散エネルギー
K	: モード剛性
M	: エルボに負荷されるモーメント
M_n	: モード質量
X_{max}	: 最大応答変位
X_0	: 代表解析での最大応答変位

* 原稿受付 2003 年 6 月 6 日。

^{*1} 正員, 石川島播磨重工業(株)エネルギーシステム事業部原子力プロジェクト部 (〒235-8501 横浜市磯子区新中原町 1)。^{*2} 正員, (独)防災科学技術研究所総合防災研究部門 (〒305-0006 つくば市天王台 3-1)。^{*3} 正員, 横浜国立大学大学院工学研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)。

E-mail: akihito_ootani@ihi.co.jp

防災科学技術研究所の一次元大型振動台を用いた配管系モデル加振実験が、平成10年度～平成12年度に実施された²⁾。この実験では、大きく分けて平面配管系モデル及び立体配管系モデルの2種類が用いられている。2種類の配管系モデルの構造を図1に示す。

5 種類の配管系モデルでの加振実験結果と、本研究で検討した簡易弾塑性応答解析法による解析結果を比較し、この適用性を検討した。

(a) 2D piping model

(b) 3D piping model

Table 1 Elbows of piping models

Piping model	Elbows	Nominal dimension (mm)		
		Diameter D (mm)	Bending radius R (mm)	Thickness t (mm)
2D-A01	EL1	114.3	152.4	8.6
	EL2			11.1
	EL3			
2D-C01	EL1	114.3	152.4	6.0
	EL2			8.6
	EL3			11.1
3D-A01	EL1	114.3	152.4	8.6
	EL2			
	EL3			
3D-C01	EL1	114.3	152.4	4.5
	EL2			8.6
	EL3			
3D-C02	EL1	114.3	152.4	4.5
	EL2			8.6
	EL3			

Fig. 1 Configuration of piping models

(a) 2D piping model test (Excitation level 1.0 m/s^2)

(b) 3D piping model test (Excitation level 1.0 m/s²)

Fig. 2 Excitation waves used for piping model tests

4. 簡易弾塑性応答解析法

4.1 簡易弾塑性応答解析法の概要

弾塑性応答解析については、古くは 1960 年に建築構造物の地震応答挙動を多質点のモデルによりシミュレーションした研究⁶⁾がある。近年、配管系を対象とした弾塑性応答解析に関する研究が行われており、FEM による詳細解析法に関する研究⁹⁾、塑性変形に伴う剛性、減衰効果を等価線形化した解析法の研究¹⁰⁾が行われている。FEM を用いた詳細解析法は、材料非線形性を考慮した直接積分法による振動応答解析であり、モデル化及び非線形の材料特性が適切に考慮されれば、最も実際の弾塑性応答挙動に近い結果を与えられとされる。しかし、現時点では、材料特性設定の確立された方法が無いこと、解析に多くの時間を要することが短所となっている。等価線形化法による解析は、弾塑性応答の最大応答量を計算する方法であり、上記の詳細解析よりも短時間で計算できる利点がある。

本研究での簡易弾塑性応答解析法も後者の等価線形化法を用いた方法の一つである。この方法では、エルボの塑性変形で生じる履歴エネルギー吸収量を等価減衰比として近似式で表し、また、等価減衰比と振動応答量の関係を近似式で表すことにより、変位依存型の非線形減衰での最大応答量の計算において必須となる収束計算を、より簡便に短時間でできるようにしたものである。なお、現行の耐震設計では、モーダル解析をベースとした応答スペクトル解析が広く用いられており、この解析により配管系の最大振動応答量が計算され、配管各部の応力計算、評価が行われている。本研究の解析法は、最大応答量を計算するという観点では、現行の解析法と同種のものであるが、塑性変形による減衰効果の増大を考慮できる簡易解析法となっている。

本研究で検討を行った簡易弾塑性応答解析法の手順を以下に示す。

- ① 配管系において変形が集中すると考えられるエルボを対象に、FEM を用いた静的弾塑性解析を実施する。塑性変形を生じる場合の荷重変位曲線をこの解析で求める。エルボの塑性変形による消散エネルギーは、荷重変位曲線の内部面積として計算することができる。複数の変形レベルにおける消散エネルギーを求めることで、エルボの変形量（曲げ角度）と消散エネルギーの関係を求める。
- ② 振動モード解析を行い、固有振動数、モード剛性を求める。また、配管系の弾塑性応答に支配的な振動モードにおけるモード形状を求める。

(a) 2D piping model test (Excitation level 1.0 m/s²) (b) 3D piping model test (Excitation level 1.0 m/s²)

Fig. 3 Power spectrum density of excitation wave

(a) 2D piping model test (Excitation level 1.0 m/s²) (b) 3D piping model test (Excitation level 1.0 m/s²)

Fig. 4 Response spectra of acceleration

- ③ 代表減衰比での加速度応答スペクトル及び複数の減衰比での変位応答スペクトルを計算する。複数の減衰比における変位応答スペクトルより、上記②で求められた固有振動数における最大応答変位と減衰比の関係を求める。
- ④ 任意の種類の減衰比及び入力レベルでの応答スペクトル解析（代表解析）を行い、配管系の最大応答変位を求める。任意の入力レベルにおける最大応答変位と減衰比の関係は、③で求められた減衰比と応答変位の関係及び入力レベルと応答変位の比例関係より計算することができる。本研究では、これらの関係を基に、任意の入力レベル、減衰比での最大応答変位を下式で近似した。
- $$X_{\max} = \frac{\alpha_{\text{in}}}{\alpha_0} \cdot X_0 \cdot \left(\frac{B_1}{\xi} + B_2 \cdot e^{-B_3 \cdot \xi} + B_4 \right) \quad (1)$$
- ⑤ 応答スペクトル解析で求められたエルボの変形量、配管系の最大応答変位及び②で求められたモード形状を基に、塑性変形を想定するエルボの変形量と最大応答変位の比率を求める。塑性変形を想定するエルボは、応答スペクトル解析結果を基に、応力が大きくなるエルボを選定する。
- ⑥ ①で計算されたエルボの塑性変形に伴う消散エネルギーと、②で求められたモード剛性より、塑性変形による減衰効果を考慮した等価減衰比を、最大応答変位の関数として下式で表す。

$$\begin{aligned} \zeta_{\text{eq}} &= \zeta_{\text{EL}} + \zeta_{\text{PL}} \\ &= \zeta_{\text{EL}} + \frac{\Delta E}{4 \cdot \pi \cdot E} \\ &= \zeta_{\text{EL}} + \frac{\Delta E}{2 \cdot \pi \cdot M_n \cdot \omega_n \cdot X_{\max}^2} \end{aligned} \quad (2)$$

- ⑦ 任意の入力レベルにおいて、式(1)と(2)が同時に成立する等価減衰比及び最大応答変位を数値計算により算定する。

4.2 消散エネルギーを求めるためのFEM解析

前述の配管系モデルに使用されたエルボを対象に、面内曲げでの塑性変形による消散エネルギーをFEM解析により計算した。FEM解析モデルを図5に示す。このモデルでは、エルボ部分を周方向48分割、軸方向12分割し、シェル要素でモデル化している。エルボ端部の直管部は外径の4倍の長さとした。この解析モデルに加振実験と同一の内圧を負荷し、繰返し強制変位を静的に負荷する弾塑性解析を行った。複数の強制変位振幅レベルで

の解析を実施し、振幅レベルによる荷重変位曲線の変化を調べた。

FEM解析により求められた荷重変位曲線の一例を図6に示す。この図における曲げ角度 θ 及びモーメント M は、図5に示す形状と次式を基に、水平方向の強制変位量 δ 及び反力 F を換算したものである。

$$\theta = \frac{1}{2} \cdot \left[\pi - 4 \cdot \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{2} \cdot L - \delta}{2 \cdot L} \right) \right] \quad (3)$$

$$M = F \cdot L \cdot \cos \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta}{2} \right) \quad (4)$$

この解析ではABAQUS Ver.5.8を用いた。硬化則として移動硬化則、応力ひずみ特性として降伏応力 346 MPa、縦弾性係数（一次勾配）203 GPa、二次勾配 1.02 GPa のバイリニア近似曲線を用いた。

Fig. 5 FEM analysis model of elbow

Fig. 6 Force-disp. curves by FEM analysis
(D=114.3 mm, R=152.4 mm, t=8.6 mm)

エルボの塑性変形により生じる消散エネルギーは、解析で求められた荷重変位曲線 1 サイクルの内部面積として計算することができる。エルボの曲げ角度 θ と消散エネルギー Δe の関係を図 7 に示す。この FEM 解析で計算された消散エネルギーに対して、エルボ曲げ角度 θ を変数とした次の近似を行った。

$$\begin{cases} i) \theta < A_2 \Rightarrow \Delta e = 0 \\ ii) \theta \geq A_2 \Rightarrow \Delta e = A_1 \cdot (\theta - A_2) \end{cases} \quad (5)$$

この近似式では、エルボの曲げ角度 θ が A_2 に到達するまでは、塑性変形による消散エネルギー Δe は零、これ以上の曲げ角度では直線的に増加すると仮定している。FEM 解析で得られた消散エネルギーを最小 2 乗法で近似し、表 2 に示す係数 A_1 、 A_2 を得た。

Fig. 7 Dissipation energy by FEM analysis
(D=114.3 mm, R=152.4 mm, t=8.6 mm)

Table 2 Coefficients of dissipation energy approximation

Nominal dimension			Coefficients	
D (mm)	R (mm)	t (mm)	A_1 (kNm/rad)	A_2 (rad)
114.3	152.4	4.5	39.8	0.0257
		6.0	62.1	0.0249
		8.6	108	0.0245
		11.1	165	0.0191

Table 3 Natural frequency and modal mass

Piping Model	Fundamental Frequency (Hz)	Modal Mass (kg)
2D-A01	3.20	600
2D-C01	3.04	602
3D-A01	2.74	384
3D-C01	2.20	387
3D-C02	2.44	388

4.3 振動モード解析及び応答スペクトル解析

図 8 に示す解析モデルを用いて振動モード解析及び応答スペクトル解析を行った。振動モード解析で求められたモード質量と固有振動数より、配管系全体の振動エネルギーを下式で表す。

$$E = \frac{1}{2} \cdot M_n \cdot \omega_n^2 \cdot X_{\max}^2 \quad (6)$$

振動モード解析には、SAP-V/2 をベースとした配管系設計解析コード ISAP-III を用いた。振動モード解析で求められた 1 次固有振動数、モード質量を表 3 に示す。

振動モード解析と同じ解析プログラムを用い、代表解析（本研究では減衰比 0.5%，入力レベル 10 m/s^2 の応答スペクトル解析）を実施した。この解析で求められた最大応答変位と、数種類の減衰比による変位応答スペクトルを基に、複数の減衰比における最大応答変位を求め、式(1)による近似を行った。図 9 に近似結果の一例を示す。表 4 にこの近似における係数を示す。

(a) 2D piping model (b) 3D piping model

Fig.8 Analysis models of piping

Fig.9 Example of response approximation
(2D-A01, Excitation level 10 m/s^2)

また、代表解析条件の解析では、最大応答変位 $X_{\max}$ に対するエルボ曲げ角度 θ の比率 γ を計算した。表 5 に各試験体における γ の値を示す。ここでエルボの曲げ角度 θ は、エルボの開閉変位 δ と図 5 に示す長さ L を基に式(3)により計算したものである。なお、 δ 、 θ 及び $X_{\max}$ は、それぞれの間に比例関係は成立せず、 γ は $X_{\max}$ により変化する。しかし本研究では、 γ を応答レベルに依存しない一定値として設定した。振動モードベクトルの回転成分より、各エルボの開閉角度を求め、エルボ間のこの角度の比率が一致するよう γ を定めた。

前述の式(6)は最大応答変位に対する曲げ角度の比率 γ を用いて次の式で表すことができる。

$$\begin{cases} i) \gamma \cdot X_{\max} < A_2 \Rightarrow \Delta e = 0 \\ ii) \gamma \cdot X_{\max} \geq A_2 \Rightarrow \Delta e = A_1 \cdot (\gamma \cdot X_{\max} - A_2) \end{cases} \quad (7)$$

配管系で生じる消散エネルギー ΔE を、塑性変形が生じる全エルボの消散エネルギーの合計として下式で表す。

$$\Delta E = \sum_i \Delta e_i \quad (8)$$

Table 4 Coefficients of response approximation

Piping Model	B_1	B_2	B_3	B_4
2D-A01	0.00255	0.483	12.0	0.100
2D-C01	0.00119	0.727	12.2	0.123
3D-A01	0.00274	0.364	11.3	0.117
3D-C01	0.00359	0.309	9.2	0.090
3D-C02	0.00168	0.604	15.0	0.160

* The coefficients are for the approximation by Eq.1.

Table 5 Ratios of bending angle to max. disp

Piping model	Elbow No.	$\gamma (= \theta / X_{\max})$ (rad/m)
2D-A01	EL 1	0.209
	EL 2	0.208
	EL 3	0.153
2D-C01	EL 1	0.234
	EL 2	0.183
	EL 3	0.161
3D-A01	EL 1	0.156
	EL 2	0.124
3D-C01	EL 1	0.228
	EL 2	0.203
3D-C02	EL 1	0.216
	EL 2	0.140

* θ is calculated from Eq. 3.

4.4 簡易弾塑性応答解析

塑性変形の減衰効果を等価減衰比を次式で表す。

$$\zeta_{PL} = \frac{\Delta E}{4 \cdot \pi \cdot E} = \frac{\Delta E}{2 \cdot \pi \cdot M \cdot \omega_n^2 \cdot X_{\max}^2} \quad (9)$$

この式は摩擦の減衰効果等を、等価な線形減衰として表すのに用いられる式であり ω_n 、弾性域の減衰比を加えたものが式(2)となる。

以上より、減衰比と最大応答変位の関係及び塑性変形による等価減衰比を、それぞれ式(1)及び(2)により近似することができた。式(1)において ζ を ζ_{eq} と読み替えて、両式が同時に成立する等価減衰比 ζ_{eq} 及び最大応答変位 $X_{\max}$ を、Microsoft Excel 2000 のソルバーを用い算定した。

解析で求められた最大応答変位と試験結果の比較を図 10 に示す。また、最大応答変位と各エルボでの曲げ角度の比率 γ より計算されるエルボの曲げ角度 θ のレンジを同図に示す。なお、2D-A01、2D-C01 のエルボ曲げ角度は計測が行われていないため解析結果のみを示した。

この図に示すとおり、解析結果は実験結果とほぼ一致する結果となった。加振レベルの大きい領域で最大応答変位の実験と解析の乖離が顕著になっているが、解析では考慮されていない塑性変形に伴うエルボ曲げ剛性低下、固有振動数低下によるものと考えられる。また、3D-C02 におけるエルボ曲げ角度範囲が、実験との差異が大きくなっているが、これも剛性低下に伴う各エルボ間の変形バランスの変化が影響していると考えられる。

5. 結 論

本研究では、エルボの塑性変形による減衰効果を考慮した簡易弾塑性応答解析方法を検討した。この解析法では、塑性変形により生じる減衰効果を最大応答変位に依存する等価線形減衰として近似し、最大応答変位と等価減衰比という互いに依存し合う量を数値計算により求めた。この結果を 5 種類の配管系モデルでの実験結果と比較したところほぼ一致することが確認された。

この解析法では、FEM による静的弾塑性解析以外は、現行の耐震解析で用いられている応答スペクトル計算、振動モード解析及び応答スペクトル解析が利用されている。将来、エルボの消散エネルギー近似式がデータベース化されるならば、線形振動解析のみで弾塑性応答における最大振動応答量を予測できることとなる。ただし、本解析法は単一振動モードが卓越する配管系の振動応答のみに有効と判断される。複数の振動モードにより塑性変形が生じる場合は、モード毎の等価減衰比設定方法、モードの合成方法等の検討及び実験での検証が必要である。

本研究は原子力安全研究年次計画（平成 8 年度～平成 12 年度，原子力安全委員会策定）に基づき，科学技術庁国立機関原子力試験研究費を軸に，防災科学技術研究所，横浜国立大学，石川島播磨重工業の共同研究として実施したものである。

文 献

- (1) H. Shibata, M. Makiguchi, A. Ito, J. Hirose, Y. Kajimura, Y. Niino, T. Hayashi, T. Chiba, A Damping Characteristics of Piping Systems in Nuclear Power Plants, ASME PVP-Vol.73, (1983), 151-178.
- (2) 中村いずみ, 大谷章仁, 白鳥正樹, 機器・配管系の経年変化を伴う耐震安全裕度評価手法の研究報告書, 防災科学技術研究所研究資料, 第 202 号, (2001), 25-35.
- (3) 日本機械学会編, 振動工学におけるコンピュータアナリシス, (1987), 245, コロナ社.
- (4) Penzien, J., Elasto-Plastic Response of Idealized Multi-story Structures Subjected to a Strong Motion Earthquake, 2 WCEE, 1960.
- (5) C. H. Hofmayer, Y. J. Park, J. F. Costello, Prediction of High Level Vibration Test Results by Use of Available Inelastic Analysis Techniques, Vol. K, SMIRT 11, 1991.
- (6) (財)原子力発電技術機構, 平成 12 年度 耐震設計高度化調査 機器・配管の弾塑性応答評価法の調査 報告書, 平成 13 年 3 月.
- (7) 長松昭男, 内山勝, 斉藤忍, 鈴木浩平, 背戸一登, 原文雄, 藤田勝久, 山川宏, 吉田和夫, ダイナミクスハンドブック 運動・振動・制御, (1993), 150, 朝倉書店.

Fig.10 Results of elastic plastic response analysis